

不圧および被圧井戸における限界揚水量での水位低下率の事例研究

Case Study of Drawdown rate at Critical Yield in Unconfined and Confined Wells

木村 隆行¹⁾, 渡辺 俊一²⁾, 今田 真治³⁾, 西垣 誠⁴⁾

- 1) Takayuki KIMURA, 技師長, (株)エイト日本技術開発, kimura-ta@ej-hds.co.jp
- 2) Shunichi WATANABE, GS マネージャー, (株)エイト日本技術開発, watanabe-shu@ej-hds.co.jp
- 3) Masaharu IMADA, GS マネージャー, (株)エイト日本技術開発, imada-ma@ej-hds.co.jp
- 4) Makoto NISHIGAKI, 理事長, 統合物性モデル技術研究組合, n_makoto@imtera.or.jp

限界揚水量や適性揚水量は井戸施工後に井戸毎に求められるが、施工前に推定する指標や目安がない。そのため、実務上は古い指針などを目安にするしかなく、技術者に左右され、必ずしも適切な推定がされていない。本論文では、初期水深 H に対する限界揚水量での水位低下量 s_c の比率を限界水位低下率 $\alpha_c(=s_c/H)$ とし、不圧井戸においては事例や Dupuit の不圧式から $\alpha_c=1/3H$ であることを示した。また、被圧井戸の事例においては、初期水深 H (井戸底を基準とした水深)と帯水層厚 b の比率、つまり圧縮比 H/b と限界水位低下率 α_c に相関がある可能性を示した。これらにより、実務上、事前に限界揚水量を設定できる可能性があることを示した。

キーワード：限界揚水量, 不圧井戸, 被圧井戸, (IGC : D-04, E-07,C-08)

1. はじめに

道路や河川工事の計画に伴い、工事箇所周辺で井戸の代替水源として取水井戸が検討されることがある。また、簡易水道や農業・工業用水などの水源確保目的で、取水井戸が検討されるなど、さまざまな取水井戸が計画される。その場合、帯水層厚や透水係数を把握した段階で、取水可能な適正揚水量を井戸公式（平衡式）により試算することが多い。その適正揚水量は、表-1 に示すように限界揚水量の 70~80%とされることが多い^{1)~7)}。

限界揚水量は、一般的に段階揚水試験の各段階での水位低下量 s （揚水前初期水位からの低下量）と揚水量 Q （その水位低下量での各揚水量）を数段階プロットし、 $s-Q$ 線の勾配変化点により推定されている⁶⁾。さく井工事では段階揚水試験時に揚砂量を測定するが⁸⁾、揚砂量が多くなる現象は $s-Q$ 線の勾配変化点より水位低下量が大きくなる側で発生することが多いと言われている⁹⁾。その勾配変化点は、比湧出量 Q/s の変化点ということだけでなく、井戸周辺で乱流域が拡大し砂の混入量が増大する変化点であることから、ポンプの羽の摩耗や井戸底の砂の沈積など維持管理上の問題と、濁度など水質上の問題からも井戸の限界揚水量として扱っている⁹⁾。

限界揚水量の語源は Rorabaugh の「井戸損失が実用上無視してよいほど小さい揚水量の最大値」であり¹⁰⁾、井戸損失が小から大になる $s-Q$ 線の勾配変化点の揚水量を、本論文でも限界揚水量と考える。

また、森らによれば、段階揚水試験による揚水量と水

表-1 適正揚水量の指標^{1)~7)}

指標類	適正揚水量
工業用水道施設設計指針・解説(1989) ¹⁾ p41	限界揚水量の70%以下
工業用水道維持管理指針(1993) ²⁾ p17	限界揚水量の80%を目安
井戸等の管理技術マニュアル(1999) ³⁾ p27(不圧)	計算事例(適正と推定) $H \times 0.8$
井戸等の管理技術マニュアル(1999) ³⁾ p70(被圧)	限界揚水量の70%を適正揚水量
井戸の改修及び更新の事例集(2000) ⁴⁾ p60(不圧)	適正は最大揚水量の50%以下
井戸の改修及び更新の事例集(2000) ⁴⁾ p60(被圧)	限界揚水量の70%以内
工業用水道施設設計指針・解説(2004) ⁵⁾ p34	限界揚水量の80%経験値、広域水収支考慮
水道施設設計指針(2012) ⁶⁾ p92	限界揚水量の70%以下
工業用水道施設設計指針・解説(2018) ⁷⁾ p33	限界揚水量の80%経験値、広域水収支考慮

位低下量の勾配変化点の多くが、本来、曲線を折れ線とした見かけ上の擬似折れ点であり、曲線そのものは Jacob の経験式 $s=BQ+CQ^2$ で近似できる井戸が多いとしている¹¹⁾。その場合、曲線の最大曲率点の揚水量は $Q=0.5126B/C$ で求められるが、それを適正揚水量の指標とした場合は、井戸能力を過小評価することになるとしている。また明確な折れ線がない曲線では、擬似折れ点を限界揚水量として誤認識している可能性があることを指摘している¹¹⁾。

しかし、これら限界揚水量は井戸設置後の段階揚水試験によるもので、井戸設置前に限界揚水量を設定する指標ではない。これは、井戸毎に井戸損失や限界揚水量が異なることや、必要揚水量が限界揚水量未満になることもあるためである。現場によっては、結果として最適なポンプが用意できずに不明瞭な段階揚水試験になることもある。しかし、計画時においては可能な揚水量を想定する必要があり、現状は指標のない中で井戸を計画しなければならない事になる。

そのため、計画段階では不圧井戸の井戸底まで水位低下させた揚水量を限界揚水量とし、その70%を適正揚水量とする技術者も出てきており、揚水量を過大評価するケースも見受けられる。また、専門技術者は、最新の「工業用水道施設設計指針・解説(2018)」⁷⁾では、「土木学会水理公式等を参考(不圧井戸)」としか記載されていないため、計算事例(井戸効率 $c=0.5$)のある過去の「工業用水道施設設計指針・解説(1989)」¹⁾を現在も使用している。被圧井戸では、そのような目安もなく、近接井戸から想定するしかない状況である。

つまり、計画時での限界揚水量や適正揚水量の設計指標がないため、限界揚水量は技術者判断に任せられ、未経験の技術者では過大な量を推定するケースも見受けられる。そのため、実務では計画時に限界揚水量を設定できる新しい指標や目安が不可欠と考えられる。

この経緯から木村らは Dupuit の不圧式で $s-Q$ 相関図を作成し、その勾配変化点から揚水前の初期水深 H (井戸底からの水深) に対し、限界揚水量での水位低下量 s_c が初期水深 H の $1/3$ 程度となることを示した¹²⁾⁻¹⁴⁾。また、過去の工業用水道施設設計指針・解説(1989)の計算例と対比し整合していることを示し、収集した不圧井戸の段階揚水試験のデータの平均値と一致することを示した¹⁴⁾。

本論文では、不圧井戸に関する研究を、曲線特性の検討を追加した上で再整理し、被圧井戸に対しても限界揚水量を推定する手法を提示するものである。

2. 不圧地下水における限界揚水量の検討

2.1 Dupuit の不圧式と Jacob の経験式の比較

Dupuit の不圧式は、図-1 に示す条件で式(7)の被圧式から Dupuit が変形して式(1)として求められている¹⁵⁾⁻¹⁷⁾。つまり、3章の被圧地下水に対する式(7)の帯水層厚を $b=(H+h_0)/2$ とすると、揚水量 Q は式(1)になり、地下水位低下とともに帯水層厚が変化していくことが式の中に含まれていることになる。

$$\begin{aligned}
 Q &= [2\pi k \{ (H+h_0)/2 \} (H-h_0) / \ln(R/r)] \\
 &= \{ \pi k (H+h_0) (H-h_0) \} / \ln(R/r) \\
 &= \{ \pi k (H^2 - h_0^2) \} / \ln(R/r) \quad (1)
 \end{aligned}$$

ここで、

- H : 初期水深(完全貫入井の井戸底を基準の水深),
- h_0 : 井戸水深(井戸外側部での井戸底からの水深),
- b : 帯水層厚(揚水中の平均帯水層厚),
- k : 透水係数, R : 影響圏, r : 井戸半径,
- Q : 揚水量.

式(1)を使用し、仮に $H=9\text{m}$ (3の倍数で $1/3H$ を表示しやすいため仮に設定) とし、 $k=1.0 \times 10^{-3} \text{m/s}$, $r=0.1\text{m}$, $R=300\text{m}$ の場合の水位低下量 s と揚水量 Q を、段階揚水

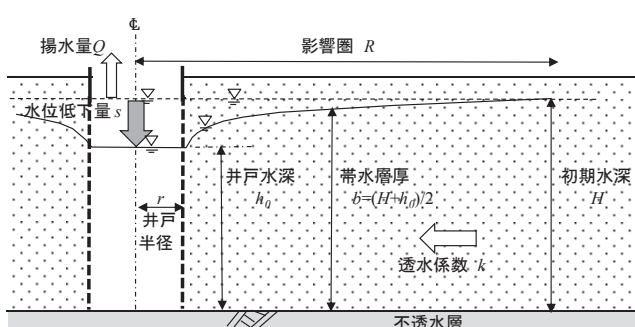


図-1 Dupuit の不圧式のモデル図

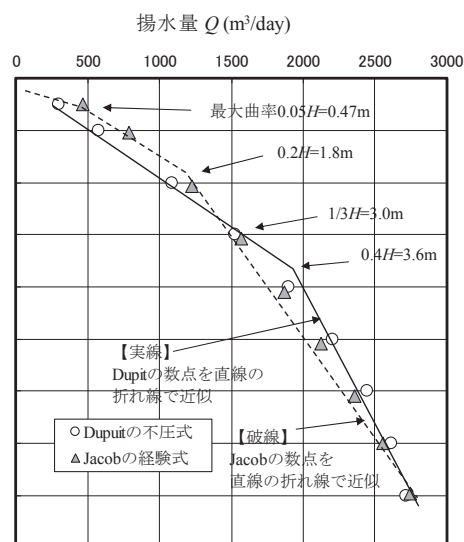


図-2 断続データによる線形軸 $s-Q$ 相関図

試験に準じ数段階で求め、線形軸で図-2 に示した。実線がその変化点を折れ線で近似した例である。

その Dupuit の不圧式の値を使用し多項式の相関式を求めると、式(2)になり、 $n=2$ とする Jacob の経験式(3)と一致する。その場合、水層損失係数 $B=7.0 \times 10^{-4}$, 井戸損失係数 $C=8.0 \times 10^{-7}$ で近似できる。また森らによると、最大曲率点は式(4)となり、式(4)と式(2)から Jacob の経験式の最大曲率の水位低下量 s を求めると、 0.47m となった。この Jacob の経験式の断続データも図-2 に示し、破線で折れ線を表示した。

$$s = 7.0 \times 10^{-4} Q + 8.0 \times 10^{-7} Q^2 \quad (2)$$

$$s = BQ + CQ^n \quad (n=2 \text{ とする近似解}) \quad (3)$$

$$Q = 0.5126B/C \quad (4)$$

ここで、

- Q : 揚水量, s : 水位低下量, B : 水層損失係数,
- C : 井戸損失係数.

図-2 は断続データであり、変化点は直線の描き方やデータの点数によりある程度幅がある。Jacob の経験式は、 $0.05H \sim 0.2H$ 程度に変化点が見られ、Dupuit の不圧式は、 $1/3H$ を中心に $0.2H \sim 0.4H$ 程度に分布している。いずれも、曲線変化を断続点として直線で近似しているため、直線の変化点はある程度の誤差が生じると考えられる。

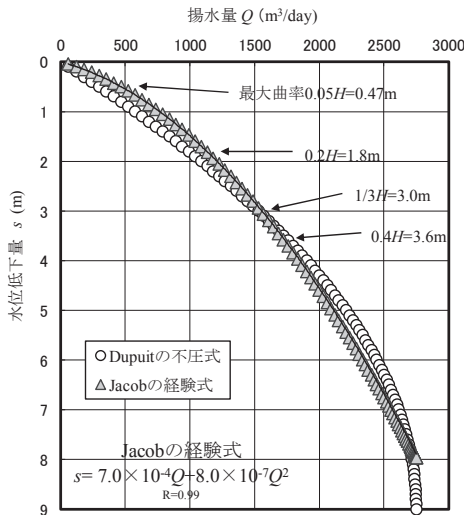


図-3 連続データによる線形軸 s - Q 相関図

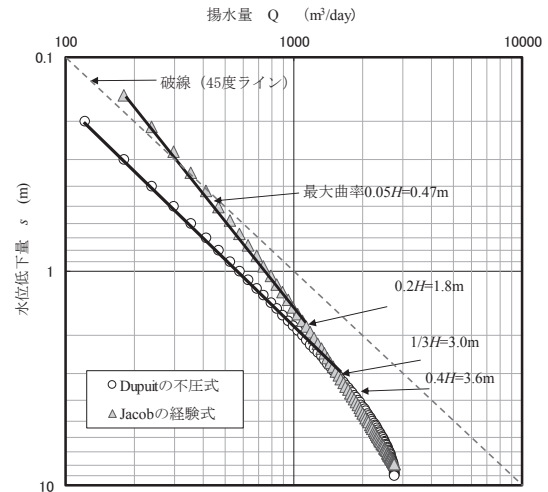


図-4 連続データによる線形軸 s - Q 相関図

ここで、図-2 に示した同じ条件により、連続データの線形軸で s - Q 相関図を作成したものが図-3 である

図-3 で示すように、係数の取り方にもよるが、Jacob の経験式は、放物線であり曲線の大きな凸カーブが水位低下の最初に生じるため、変化点は $0.05 \sim 0.2H$ 程度になると考えられる。Dupuit の不圧式では大きな凸カーブが水位低下の大きい領域で生じているため、変化点は $0.2 \sim 0.4H$ 程度になる。つまり Jacob の経験式は前半凸型で、Dupuit の不圧式は後半凸型のため、その曲線特性の差が変化点の差として生じており、擬似変化点として限界揚水量となる変化点を設定する場合は、両者に大きな差が生じることになる。

ここで線形軸ではなく対数軸として s - Q 相関図を図-4 として示す。図-4 では、Jacob の経験式は 45 度ラインより大きくなっている。日本水道協会「井戸等の管理技術マニュアル」では、45 度ラインは水位低下量 s と揚水量 Q が比例していることを意味し、45 度ラインより大きくなると井戸損失や乱流が起きて水位低下 s が大きくなるのでその変化点を限界揚水量と定義している³⁾。

図-4 の破線の 45 度ラインは、式(3)の $s=BQ+CQ^n$ の $n=2$ で近似した近似解ではなく、 $n=1$ とした $s=BQ+CQ$ で示す式である¹⁰⁾。そのため、 $n=2$ の Jacob の経験式であれば、最初から井戸損失の拡大を見込んでいることになる。

このことから式(3)の $s=BQ+CQ^n$ の n が、途中で 1 から 2 に転移する点が、理想的な限界揚水量の変化点の意味と考えられる。ただし、図解法で求める現実の井戸は、必ずしも $n=1$ から 2 ではない。井戸毎の固有の数値になるが、少なくとも変化点を境界に n などの係数が転換する変化点になっている¹⁰⁾。

そのため、最初から変化点の前後を含めて同じ $n=2$ で B と C を固定する場合は、途中で流入速度の変化による乱流の大きな増大がないことになり、最初から同じような乱流が発生している条件になる。つまり、最初から 45 度ラインより大きく、放物線の凸型特性のため水位低下量の小さい位置に最大曲率点が発生する。最初から井戸

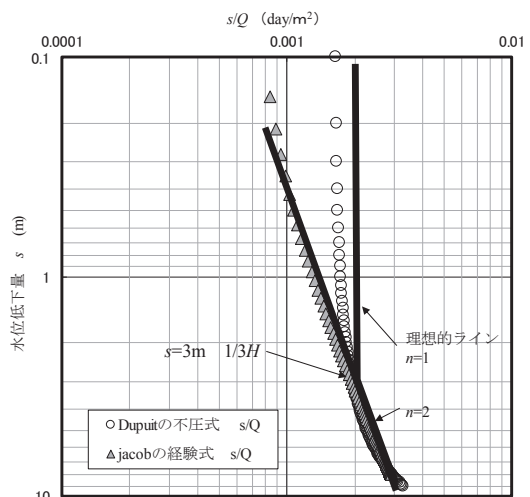


図-5 連続データによる対数軸 s - s/Q 相関図

損失が継続するような井戸や、揚水量が少なく転移点を確認できない井戸が考えられる。

図-4 で Dupuit の不圧式の場合は、水位低下 $2 \sim 3\text{m}$ 程度まで 45 度ラインで近似でき、井戸損失の少ない状況を再現できている。その後、45 度ラインより大きくなるので、限界揚水量の変化点が擬似的に確認できる。平均帯水層厚 b の変化が、比湧出量 Q/s の変化として擬似的な井戸損失を表現できているためと考えられる。

図-5 は、 s と s/Q の相関図を対数軸で示した。理想的な取水は式(3)の $n=1$ で s/Q が一定であり、乱流が発生しはじめると s/Q が増大し、 $n=2$ で近似できる。この理想的なラインを図-5 中に 2 本の直線で示した。 $n=2$ で井戸損失が大きい領域を、Jacob の経験式と Dupuit の不圧式がほぼ重なる領域とした場合、その起点側境界は水位低下 $s=3\text{m}$ (つまり $1/3H$)程度となる。その変化点が限界揚水量の水位低下深度である。この $1/3H$ や $s=0.05 \sim 0.2H$ の値は、帯水層の厚さや透水係数など仮定のもとに設定しているが、式(1)や式(3)の特性によるもので係数の値が変化しても同様の傾向になる。

式(3)の $n=2$ の Jacob の経験式で全体を近似できる場合は、最初から一定の井戸損失と乱流が継続するような井戸で、本来、 n や B , C の係数が転移するような大きな変化点がない井戸と想定される。

Dupuit の不圧式は、曲線ではあるが最初は井戸損失が少なく、その後井戸損失が大きくなる擬似的な曲線になる。Rorabaugh の「井戸損失が実用上無視してよいほど小さい揚水量の最大値¹⁰⁾」という意味でも、井戸損失の大小が変化点になる限界揚水量を、擬似的に再現しているので、 $s=1/3 H$ 程度に限界揚水量を設定することは可能と考えられる。

2.2 不圧井戸の段階揚水試験の事例

木村らは、過去に不圧井戸(完全貫入井)における段階揚水試験の 21 地点の事例を収集し、図-6 で示すように初期水深 H に対する限界揚水量での水位低下量 s_c の比率を、限界水位低下率 α_c として示せることを提示した¹⁴⁾。

ここで、 α_c の定義は以下である。

$$\alpha_c = s_c / H \quad (5)$$

ここで、

α_c : 限界水位低下率(限界揚水量での水位低下比率),

s_c : 限界水位低下(限界揚水量での水位低下量),

H : 初期水深(揚水前の初期水深)。

その一覧表を表-2 に示し、また、傾度分布図を図-7 に示す。いずれも不透水層まで到達した不圧井戸のデータで、バラツキはある。いずれも砂礫層または礫混じり砂層で、土質変化の複雑さや地域での地質変化もあるが、計画段階で扱う複雑さを考慮し、全体での評価としている。

この場合、図-7 で示すように限界水位低下率 α_c は 0.2 ~ 0.39 が多く、表-2 で示すように平均値は $\alpha_c=0.33(=1/3)$ となった。これは、Dupuit の不圧式による変化点と一致することになる。

2.3 不圧井戸の井戸効率計算事例の比較

「工業用水道施設設計指針・解説」では、1989 年版 P79 にあった井戸効率の記載「井戸公式での計算に井戸効率 $c \doteq 0.5$ を乗じる必要がある。」が、2004 年版および 2018 年版では「土木学会水理公式等を参考にする」という記載に変更になっている。理由は高開口率スクリーンが広く使用されるようになったため、井戸効率が昔ほど大きな因子でなくなったことによると考えられる。また、広域影響を考慮する場合など、一律の条件で設定できないことも要因である。しかし、土木学会水理公式等では、適正揚水量または限界揚水量を示唆する水位低下量の記述がないので、専門技術者は現在も「工業用水道施設設計指針・解説」1989 年版を使用している。

ここで、適正水位低下率を式(6)で定義する。

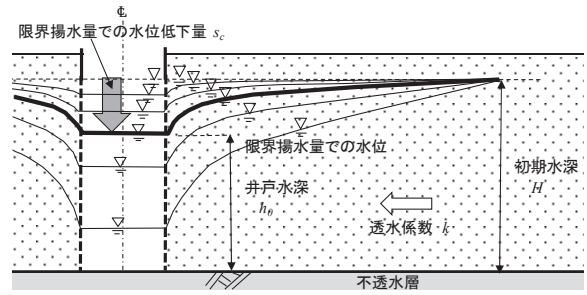


図-6 不圧井戸の段階揚水試験モデル図

表-2 不圧井戸の段階揚水試験結果と限界水位低下率

No	帯水層厚 b (m) $= (H+h_w)/2$	初期水深 H (m)	限界揚水量での水位低下量 s_c (m)	透水係数 k (m/s)	限界水位低下率 $\alpha_c (=s_c/H)$
1	2.94	3.40	0.93	1.16E+00	0.27
2	3.03	3.50	0.95	1.28E+00	0.27
3	1.19	1.35	0.32	6.69E-01	0.24
4	1.17	1.34	0.35	2.70E-01	0.26
5	3.40	4.00	1.20	1.72E-01	0.30
6	3.67	4.65	1.96	2.00E+00	0.42
7	6.91	7.80	1.79		0.23
8	12.84	15.60	5.53		0.35
9	10.51	13.00	4.99		0.38
10	3.36	4.00	1.28		0.32
11	4.14	4.90	1.53		0.31
12	5.54	6.07	1.07		0.18
13	3.50	4.10	1.20		0.29
14	5.47	7.43	3.93		0.53
15	7.08	9.20	4.25	1.00E-02	0.46
16	5.59	6.78	2.38		0.35
17	9.05	11.20	4.30		0.38
18	9.47	10.00	1.07		0.11
19	6.87	8.80	3.86		0.44
20	23.25	30.00	13.50		0.45
21	7.75	9.00	2.50		0.28
平均		7.91	2.80		0.33

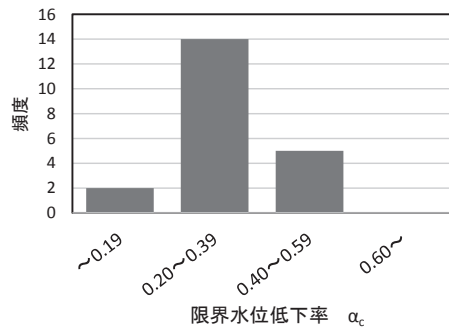


図-7 不圧井戸の限界水位低下率の頻度

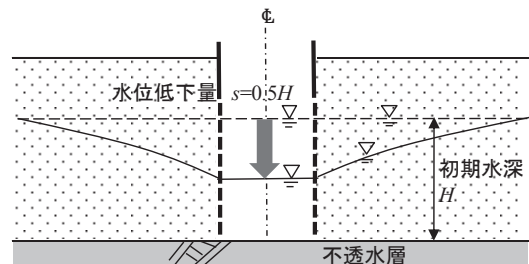


図-8 不圧井戸の水理計算モデル図¹⁾

$$\alpha_p = s_p / H \quad (6)$$

ここで、

α_p : 適正水位低下率 (適正揚水量の水位低下比率),

s_p : 適正水位低下量 (適正揚水量での水位低下量),

H : 初期水深(揚水前の井戸底からの初期水深)。

指針の1989年版の例では、図-8で示すように初期水深 H の半分 0.5 程度に水位低下線が記載されており、井戸効率 $c=0.5$ を乗じるため、適正揚水量に対応する適正水位低下率 α_p は、初期水深 $H \times 0.5 \times 0.5$ で求められる¹⁾。すなわち、 $\alpha_p=0.25$ になる ($0.5H$ の図示を計算の基準例と解釈して専門技術者は計算している)。

つまり、適正水位低下率を $\alpha_p=0.25$ とすると、逆算される限界水位低下率は $\alpha_c=0.25/0.75$ ($0.7 \sim 0.8$) $=0.33$ ($0.31 \sim 0.36$) となり、収集した表-2の事例平均値と同じになる。また Dupuit の不圧式から推定された限界水位低下率 $\alpha_c=s_c/H=1/3$ 程度とも整合していると考えられる¹⁴⁾。

2.4 不圧・放射状井戸の井戸効率計算事例の比較

2004年版「工業用水道施設設計指針・解説」のP60で、放射状井戸の井戸効率は、「井戸効率を少な目(1/3以下)に抑えるべきである。」と記載されている⁵⁾。不圧の放射状井戸の集水管の位置は、水位低下量を多く確保できるため帯水層の下部に設置されることが多い。事例では初期水深 H の $2/3 \sim 4/5$ 程度の深さの位置が多く^{1)~7)}、ここでは集水管深度を比較的多い初期水深 H の $3/4$ と仮定する。その場合、図-9に示すように適正水位低下率 α_p は、井戸効率 $1/3$ を考慮すると⁵⁾、初期水深 $H \times (3/4) \times (1/3)$ で 0.25 になる。

適正水位低下率の $\alpha_p=0.25$ から逆算すると、限界水位低下率は $\alpha_c=0.25/0.75$ ($0.7 \sim 0.8$) $=0.33$ ($0.31 \sim 0.36$) となる。この結果も、限界水位低下率は初期水深 H の $1/3$ 程度であった¹⁴⁾。放射状井戸は構造が複雑で鉛直流を期待しているので、より厳しく設定する必要はあるが、目安としては不圧井戸と同等として扱われている。

2.5 不圧井戸の限界水位低下率のまとめ

以上のように、計画時に想定できる限界水位低下率 α_c は、 $\alpha_c=1/3$ 程度で考えられる可能性を示した。その値は Dupuit の不圧式の曲線特性から見られる疑似変化点で近似でき、木村らが収集した段階揚水試験の事例の平均値であった。また過去の「工業用水道施設設計指針・解説(1989)」¹⁾の井戸効率を用いた計算事例の比較においても整合がとれ、放射状井戸の計算事例の比較においても整合がとれることが判明した。そのため、計画段階で事前に不圧井戸の限界揚水量を設定する水位低下量は、初期水深 H の $1/3$ 程度 ($\alpha_c=1/3$) とすることを、目安としてもよいと考えられる。なお、この $1/3H$ の適用可能性については、Dupuit の不圧式の適用条件となる均質な帯水層地盤が仮定できる場合に、高くなると考えられる。

3. 被圧地下水における限界揚水量の検討

3.1 Dupuit の被圧式

Dupuit の被圧式は、図-10の条件により式(7)で示される。式の中で揚水井の水位低下量 $s=(H-h_0)$ は揚水量 Q と

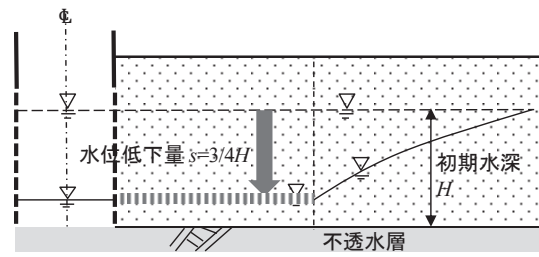


図-9 不圧・放射状井戸の水利計算モデル図

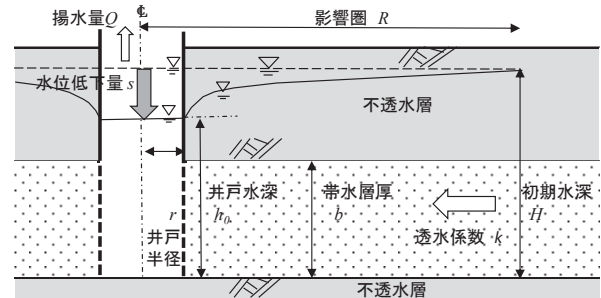


図-10 Dupuit の被圧式モデル図

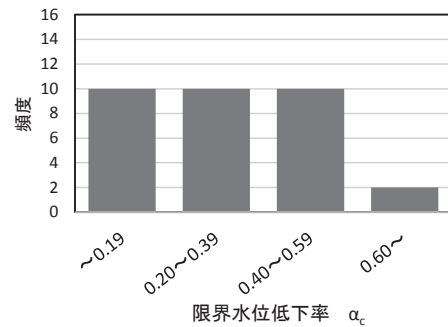


図-11 被圧井戸の限界水位低下率の頻度分布図

比例関係にあり、この式では変化点は得られず、擬似的に限界揚水量は想定できない。

$$Q = \{2\pi kb(H-h_0)\} / \ln(R/r) \quad (7)$$

ここで、

H : 初期水深(井戸底を基準とした水深で、帯水層底面からの全水頭)、

h_0 : 井戸水深(井戸外側部での井戸底からの水深)、

b : 帯水層厚、

3.2 被圧井戸の段階揚水試験の事例

本論文では、被圧井戸における段階揚水試験の32地点の事例を収集し、それらの限界水位低下率 α_c (s_c/H) を求めたものを表-3に示した。また、頻度分布図を図-11に示した。

被圧井戸の場合は不圧井戸よりバラツキが著しい。地質変化が複雑で、帯水層も数層ある場合もあるので、条件は多岐にわたるが、計画段階で扱う複雑さを考慮し、全体での評価とした。表-3で示すように全体平均値は $\alpha_c=0.33=1/3$ 程度となったが、頻度分布は図-11に示すように全体に分布し、不圧井戸と状況が異なる。

表-3 被圧井戸の段階揚水試験結果と限界水位低下率

No	帯水層厚 b (m)	初期水深 H (m)	圧縮比 H/b	限界揚水量での水位低下量 s_c (m)	透水係数 k (m/s)	限界水位低下率 a_c (s_c/H)	地質
1	2.60	10.48	4.03	1.53	5.85E-04	0.15	砂礫
2	38.50	46.32	1.20	5.07	2.31E-01	0.11	砂礫
3	8.00	12.11	1.51	2.40	1.39E-02	0.20	砂礫
4	20.00	49.96	2.50	8.50	1.58E-02	0.17	砂礫
5	19.75	27.95	1.42	0.88	5.05E-02	0.03	砂礫
6	4.00	29.72	7.43	24.02	1.59E-04	0.81	砂礫
7	10.00	40.50	4.05	6.60		0.16	砂礫
8	6.00	18.40	3.07	0.60		0.03	砂礫
9	5.00	11.00	2.20	2.92	3.70E-03	0.27	砂礫
10	10.00	26.00	2.60	0.81	7.00E-02	0.03	砂礫
11	16.00	32.00	2.00	1.20	1.00E-01	0.04	砂礫
12	10.00	26.00	2.60	10.20	1.55E-01	0.39	砂礫
13	6.00	13.17	2.20	2.67	9.61E-04	0.20	花崗岩
14	36.00	37.70	1.05	7.70		0.20	砂岩
15	6.00	19.90	3.32	6.28		0.32	安山岩
16	24.00	73.22	3.05	26.44	1.64E-03	0.36	片岩
17	32.00	38.87	1.21	4.40	7.60E-02	0.11	片岩
18	8.00	16.27	2.03	7.60		0.47	片岩
19	5.80	32.01	5.52	16.49		0.52	花崗岩
20	11.60	40.21	3.47	21.07		0.52	片麻岩
21	8.70	37.73	4.34	18.23		0.48	花崗岩
22	14.50	50.42	3.48	21.29		0.42	花崗岩
23	11.60	50.33	4.34	10.83		0.22	花崗岩
24	14.50	41.72	2.88	16.10		0.39	花崗岩
25	8.70	29.99	3.45	16.54		0.55	花崗岩
26	11.60	35.48	3.06	11.06		0.31	花崗岩
27	8.70	31.22	3.59	16.15		0.52	花崗岩
28	8.70	32.28	3.71	17.04		0.53	花崗岩
29	5.80	34.00	5.86	15.33		0.45	花崗岩
30	8.70	33.70	3.87	8.55		0.25	花崗岩
31	2.90	21.69	7.48	11.81		0.54	花崗岩
32	8.70	26.07	3.00	17.83		0.68	花崗岩
砂礫	12.49	27.54	2.21	5.39		0.20	平均
岩盤	12.13	34.80	2.87	13.67		0.40	平均
全体	12.26	32.08	2.62	10.57		0.33	平均

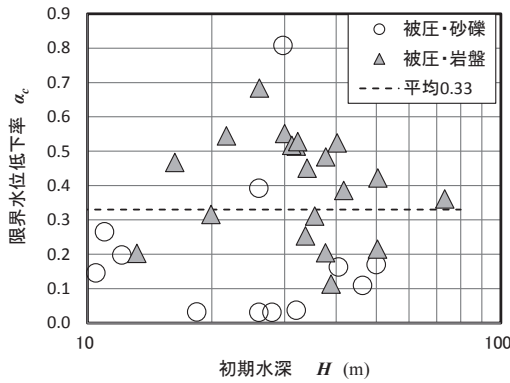


図-12 被圧井戸の初期水深 H と限界水位低下率 a_c

図-12に被圧井戸の初期水深 H と限界水位低下率 a_c の相関を示したが、相関は認められなかった。ただ、全体の平均は $a_c=0.33(=1/3)$ 程度であることが分かった。

図-13に帯水層厚 b と限界水位低下率 a_c の相関を示したが、良好な相関を認められなかった。しかし、帯水層厚が小さいほど a_c の値の変動幅が大きく、帯水層厚が厚いほど a_c が小さくなる傾向があることがわかった。

段階揚水試験の傾向を把握するため、確認できた代表的な段階揚水試験時の対数軸の $s-Q$ 相関図を図-14に示した。通常、計画予定の揚水量を確保でき十分に余裕のあるポンプを揚水試験に用意するが、その想定以上に揚水量が出る場合は、段階揚水試験の最終揚水量の水位低下が初期水深 H の $1/3$ にも到達しない場合がある。一般に井戸に本設として設置するポンプは電気代を抑えるため最低限のポンプになるが、段階揚水試験では本設とは別に揚水量の大きいポンプを用意する必要がある。しかし、結果的に用意したポンプでは不十分な場合も生じることがある。そのようなケースでも微妙な直線変化点を

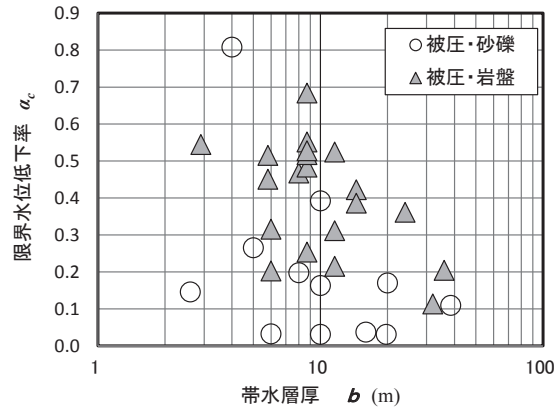


図-13 被圧井戸の帯水層厚 b と限界水位低下率 a_c

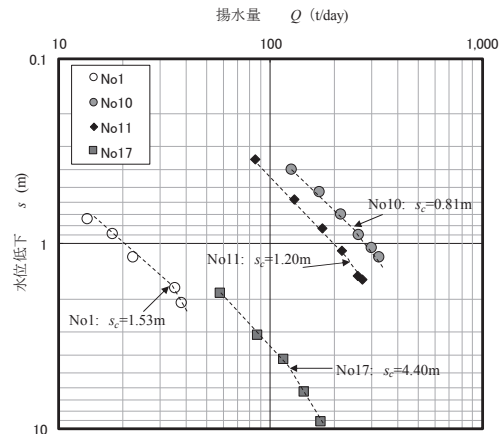


図-14 被圧井戸の a_c の小さい井戸の $s-Q$ 相関図

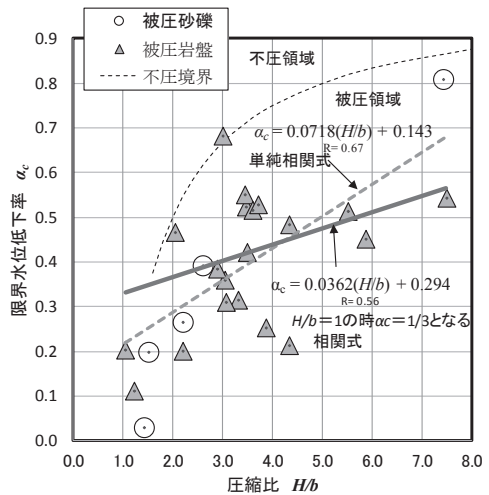


図-15 被圧井戸の圧縮比 H/b と限界水位低下率 a_c

限界揚水量として安全側に設定してしまうケースもある。その場合、本来の井戸損失が転移する変化点ではないものもある。図-14ではNo17(表-3に対応)以外は45度ラインにほぼ等しく、限界揚水量に到達していないと考えられる。そこで、これらの未転移のデータを除外して、限界水位低下率 a_c と圧縮比 (H/b) の相関図を図-15に示した。被圧地下水の圧縮比 H/b は、初期水深 H (井戸底を基準とした水深、帯水層底面からの全水頭)を分子とし、 b (帯水層厚)を分母とする比として定義した。

図-15 に示すように、被圧地下水の圧縮比 H/b は、限界水位低下率 α_c とある程度相関が認められ、圧縮比が大きいほど限界水位低下率 α_c も大きくなる傾向があることがわかる。この圧縮比は、帯水層厚に対する加圧倍率を意味する。ここでは有効間隙比は考慮していない。また、初期水位が帯水層上部境界深度まで低く一致する場合は $H/b=1$ となり不圧領域に到達することになる。現在のデータでは、概ね $H/b=1$ 以上になっている。

これらのデータで単純相関をとると、 $H/b=1$ での交点は $\alpha_c=0.21$ となるが、不圧井戸で提案したように $H/b=1$ では $\alpha_c=1/3(0.33)$ となるはずであり多少ずれている。これはデータ数が少ないことや、段階揚水試験の精度や複数帯水層の問題があり今後の課題と考えられる。ただ、被圧領域での分布傾向と不圧領域との接合を解釈できる近似式としては、式(8)が考えられる。

$$\alpha_c=0.0362(H/b)+0.294 \quad (8)$$

特に被圧井戸の場合は何層もの異なる帯水層を対象とするなど混合層になる場合もあるので、そのような場合は特にバラツキが大きくなる。式(8)は単層の不圧帯水層に整合する式であるので、被圧帯水層が単層の場合、より適用性は高くなると考えられる。

4. 結論

現状では限界揚水量は井戸設置後の段階揚水試験により得られるため、事前の設定は困難である。しかし、実務上、計画段階で適正揚水量を設定する必要が生じる。このような現状に対し、本研究では不圧井戸および被圧井戸の限界揚水量での水位低下率を、実務のデータを主として吟味し、以下の結論を得た。

- (1) Dupuit の不圧帯水層の式の曲線特性を Jacob の経験式と比較した結果や、過去の段階揚水試験の平均値、指針の計算事例との整合により、不圧井戸の限界水位低下率 α_c は $1/3H$ 程度と考えられる。
- (2) 被圧井戸については、圧縮比 H/b (初期水深 H : 帯水層厚 b) と限界水位低下率 α_c にある程度相関があり、式(8)より α_c が設定できる可能性があることを示した。
- (3) 実務で井戸を計画する場合の指標として、従来提案していた不圧井戸の限界水位低下率 α_c に加え、被圧井戸の限界水位低下率 α_c を推定する式を提案した。
- (4) なお、本研究成果は限られた揚水試験結果から提案したものであり、今後も更なるデータを収集し、AI による統計的処理なども含め精度を高められると考えられる。

参考文献

- 1) 日本工業用水協会:工業用水道施設設計指針・解説, pp.41-83, 1989.
- 2) 日本工業用水協会:工業用水道維持管理指針, p.17, 1993.
- 3) 日本水道協会:井戸等の管理技術マニュアル, pp.27-70, 1999.
- 4) 日本水道協会:井戸の改修及び更新の事例集, pp.6-60, 2002.
- 5) 日本工業用水協会:工業用水道施設設計指針・解説, pp.30-67, 2004.
- 6) 日本水道協会:水道施設設計指針, p.92, 2014.
- 7) 日本工業用水協会:工業用水道施設設計指針・解説, p.33, 2018.
- 8) 全国さく井協会:さく井工事施工指針(2021 版), pp.10-11, 2021.
- 9) NPO 法人地下水・地下熱資源強化活用研究会 (AGREA):地中熱利用技術ハンドブック, p.113, 2020.
- 10) 酒井軍次郎:地下水の水理解析法, p.90, 1980.
- 11) 森一司, 阿部栄一, 飯塚康太:段階揚水試験における s-Q 曲線に関する検討事例, 日本応用地質学会, 応用地質, 第 55 巻, 第 4 号, pp.177-184, 2014.
- 12) 木村隆行, 渡辺俊一, 今田真治:不圧帯水層における帯水層厚と限界水位低下率の相関, 地盤工学会, 第 52 回地盤工学研究発表会, pp.837-838, 2017.
- 13) 今田真治, 木村隆行, 渡辺俊一:不圧帯水層における帯水層厚と限界水位低下率の相関, 日本応用地質学会, 平成 29 年度研究発表会講演論文集, pp.221-222, 2017.
- 14) 日本応用地質学会中国四国支部:応用地質 Q&A, 中国四国版, 環-6, 取水計画での地下水低下, <https://www.jseg.or.jp/chushikoku/Q&A/3-05.pdf>, (参照 2022.5.21).
- 15) 地盤工学会:地下水調査に用いる井戸理論式の整理及び解説, 資料 3-01, pp.1-6, 2017.
- 16) 山本莊毅:新版地下水調査法, 古今書院, p.211, 1983.
- 17) Dupuit, J: Études théoriques et pratiques sur le mouvement des eaux dans les canaux découverts et à travers les terrains perméables. 2nd ed. Paris, France: Dunod, 1863.
- 18) 高橋直人, 進士喜英;誌面講座, 原位置地下水調査法の留意点と建設現場での活用, 段階揚水試験および影響範囲半径, 日本地下水学会, 地下水学会誌, 第 63 巻, 第 3 号, pp.159-171, 2021.

(2022 年 6 月 10 日 受付)

